

Study on the Effect of Pipe Installation Depth on Temporal Changes of Scouring and Sedimentation Parameters Around the River Crossing Pipelines

Sajad Bijanvand¹, Seyed Mahmood Kashefipour^{2*}, Mohammad Bahrami Yarahmadi³

1- M.Sc. in Civil Engineering, Water & Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

* kashefipour@scu.ac.ir

Received: 19 March 2021, Accepted: 23 June 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Local scouring around pipelines across the river is one of the most important causes of their failure and destruction. Therefore, it is very important to study the mechanism of occurrence of this phenomenon around the pipelines and to evaluate the amount of scouring and the characteristics of the local scour hole around them. Despite significant advances in the study of scouring, limited research has been conducted to investigate scouring around a pipeline across the river. Wu and Chiew (2013) investigated the scour hole and the flow field around a pipeline under steady flow. The flow field in these experiments was measured by an acoustic Doppler velocimeter. The results of this study showed that the presence of vortices due to the pressure difference created upstream and downstream of the pipe causes the formation of a force for the movement and displacement of sediments. Also, the flow from under the pipe into the scour hole causes it to expand further. Zhao et al. (2015) performed laboratory and numerical study of scouring under two consecutive pipelines with different distances from each other. In moving bed conditions, it was observed that the depth of the scour hole under the upstream pipe is slightly greater than the scour hole under the single pipe, while the depth of the scour hole under the downstream pipe is much greater than the scour depth compared to the single pipe. Yan et al. (2020) numerically examined the local scour around the pipeline across the river under steady flow conditions. In their study, the CFD method and variable mesh technique were used to model the sediment transport and the results were compared with the results of the laboratory model. The results showed that the method used to model scour and sediment problems respond satisfactorily. In most of the researches in this field, a comprehensive study has not been done on the temporal changes of the scour hole parameters and their focus has been mainly on the scour depth parameter when the pipe is placed on the bed. The aim of this study is to investigate the effects of installation depth of pipe across the river in steady flow on temporal changes in scour pattern and sedimentation around the pipeline were processed by recording video information during each experiment.

Methodology: The present study was performed in the hydraulic laboratory of the Faculty of

Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz in a rectangular flume 10 m long, 0.74 m wide, and 0.6 m high. The walls of the flume were made of glass and the floor was made of steel. The flume had reservoirs at the beginning and end and a section to calm the flow. To investigate the scouring phenomenon around the pipe crossing the waterway, in the middle of the flume, in an area, 1.5 m long and 15 cm thick, uniform sediments with Medium size (d_{50}) 0.7 mm, relative density (S_g) 2.65, and standard deviation (σ_g) 1.4 were poured. In this study, pipes with a diameter of 20, 40, and 60 mm at a quarter of the pipe diameter under the bed ($e/D = -0.25$), bed installation depth ($e/D = 0$), a quarter of the pipe diameter above the bed ($e/D = 0.25$), and half of the pipe diameter above the bed ($e/D = 0.5$) were used. The pipes were made of PVC and were installed perpendicular to the flow across the flume. The experiments were performed at a flow rate of 33 liters per second and a flow depth of 14 cm. The duration of all experiments was 120 minutes. The total number of experiments was 12. In these experiments, clear water conditions prevailed.

Results and Discussion: In most of the researches in this field, a comprehensive study has not been done on the temporal changes of the scour hole parameters and their focus has been mainly on the scour depth parameter when the pipe is placed on the bed. But in this study, the effect of pipe depth across the river in steady flow on temporal changes in scouring and sedimentation pattern around the pipeline with the help of information processing from filming during each experiment. Comparing the present laboratory study with other studies related to the study of diameter and depth of installation, one of the most relevant studies is related to the laboratory estimation of scour under the pipeline by Ataieyan (2012). In which the scour under the pipeline is investigated with emphasis on the effect of installation depth. The maximum amount of scouring was observed at a depth of one-fourth of the pipe diameter at the top of the bed. The result of the experiments performed in the present study also confirms that at the depth of installation, $e/D = 0.25$, due to the narrowing of a certain distance between the sub-pipe and the surface of the sedimentary bed and The formation of vertical and horizontal vortices showed the highest maximum scour depth compared to other installation depths. The results related to the effect of installation depth for different modes are as follows, $e/D = 0.25$, $e/D = 0$, $e/D = -0.25$, $e/D = 0.5$ from maximum to minimum, respectively, they had the highest amount of scour depth. Another parameter studied for scouring is the distance between the maximum scouring depth and the center of the pipe. This parameter at the beginning of the experiment was moving upstream of the pipe. By increasing the dimensions of the scour hole, the amount of downstream power is enhanced. At installation depth, $e/D = 0.5$, the highest rate of maximum scouring depth was observed downstream compared to all cases. In all experiments, about 80 to 90% of the height of the deposition ridge occurred in the first 10 to 20 minutes of each experiment.

Conclusion: The results of this study showed that at all installation depths, 80 to 90% of the scouring depth was performed in the first 40 minutes of each experiment. The depth of pipe installation was one of the most influential factors on the dimensions of the scour hole. In all experiments, sediment from erosion was deposited downstream of the pipe and formed a sediment ridge. The maximum and minimum deposition heights occurred at the installation depths of $e/D = 0.5$ and $e/D = 0.25$, respectively.

Keywords: Scouring, Installation depth of pipe, Scouring pattern, Pipeline, Steady flow.

© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مطالعه‌ی اثر عمق کارگذاری لوله بر تغییرات زمانی پارامترهای آبشستگی و رسوبگذاری پیرامون خطوط لوله متقاطع با رودخانه

سجاد بیژنوند^۱، سید محمود کاشفی پور^{۲*}، محمد بهرامی یاراحمدی^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* kashefpour@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: با احداث لوله حاوی سیالاتی مثل آب و نفت به صورت متقاطع با راستای رودخانه، الگوی جریان رودخانه در اطراف لوله تغییر می‌کند. این تغییرات منجر به افزایش شدت آشفستگی جریان اطراف لوله و افزایش تنش برشی وارد بر بستر می‌شود که نتیجه آن بروز چاله‌ی آبشستگی در زیر خط لوله می‌باشد. آبشستگی موضعی اطراف خطوط لوله عبوری از عرض رودخانه یکی از مهم‌ترین عوامل شکست و تخریب آن‌ها به‌شمار می‌رود. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی مشخصات چاله‌ی آبشستگی اطراف خطوط لوله عبوری از عرض رودخانه در شرایط عمق‌های کارگذاری مختلف در جریان ماندگار پرداخته شد. در این آزمایش‌ها از سه قطر لوله (۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر) و چهار عمق کارگذاری (یک چهارم قطر لوله زیر بستر، روی بستر، یک چهارم قطر لوله بالای بستر و نصف قطر لوله بالای بستر) استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که بالاترین میزان آبشستگی برای لوله‌ای که در عمق کارگذاری یک چهارم قطر لوله بالای بستر قرار داشت، اتفاق افتاد و ۸۰ تا ۹۰ درصد از عمق آبشستگی در ۴۰ دقیقه ابتدایی هر آزمایش صورت گرفت و در ۱۰ دقیقه ابتدایی هر آزمایش، ارتفاع پشته رسوبگذاری به حدود ۸۰ درصد مقدار نهایی خود رسید. از طرفی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان پیش‌روی عمق آبشستگی به سمت پایین‌دست نسبت به مرکز لوله، به‌ترتیب در عمق کارگذاری نصف قطر لوله بالای بستر و یک چهارم قطر لوله زیر بستر اتفاق افتاد.

کلید واژگان: آبشستگی، عمق کارگذاری لوله، الگوی آبشستگی، خط لوله، جریان ماندگار.

۱- مقدمه

آن‌ها اهمیت زیادی دارد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیری که در زمینه‌ی بررسی پدیده آبشستگی روی داده است، تحقیقات محدودی درمورد بررسی آبشستگی پیرامون خط لوله عبوری از عرض رودخانه انجام گرفته است. Maza (1987) نشان داد که آبشستگی ایجاد شده در زیر لوله تابعی از عدد فرود و فاصله نسبی لوله و بستر اولیه می‌باشد. Sumer and Fredsoe (1991) با بررسی تحقیقات پیشین نشان دادند، زبری لوله تأثیر کمی بر عمق آبشستگی دارد. Li and Cheng (1999) برای محاسبه رخ-نمای آبشستگی زیر لوله، از روش تفاضل محدود برای حل معادله لاپلاس توان بالقوه سرعت استفاده کردند. Ghodsian et al. (2000) آزمایش‌های چندی را بر روی آبشستگی در پیرامون خطوط لوله انجام دادند و عمق آبشستگی را در زیر لوله و در فاصله‌های مختلف قرارگیری لوله از بستر رسوبی اندازه‌گیری

خطوط لوله از متداول‌ترین وسیله‌ها برای انتقال آب، گاز، نفت و سیال‌های دیگر از عرض رودخانه می‌باشند. عبور خطوط لوله از عرض رودخانه‌ها، دارای توان بالقوه ایجاد آسیب و زیان‌هایی بر رودخانه و محیط‌زیست می‌باشد. خط لوله متقاطع با رودخانه ممکن است در بالای بستر، روی سطح بستر و یا زیر بستر قرار گیرد. به دلیل برهمکنش ما بین لوله، جریان رودخانه و مواد بستر، پدیده آبشستگی در بستر و پیرامون لوله گسترش می‌یابد. توسعه آبشستگی ممکن است باعث شکست و از بین رفتن خط لوله و در نتیجه سبب اختلال در بهره‌برداری، آلودگی محیط زیست و ایجاد هزینه بازسازی خط لوله شود. به همین علت بررسی ساز و کار رخداد این پدیده پیرامون خطوط لوله و ارزیابی میزان آبشستگی و ویژگی‌های چاله آبشستگی موضعی پیرامون

بررسی کردند. در این مطالعه از روش *CFD* و روش فنی مش متغیر برای مدل‌سازی رسوب‌ها استفاده شد و نتایج آن با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش استفاده شده برای مدل‌سازی مسئله‌های آبشستگی و رسوب، به شکل رضایت‌بخشی پاسخ می‌دهد. در بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه، ارزیابی جامعی روی تغییر پذیری‌های زمانی فراسنجه‌های چاله‌ی آبشستگی صورت نگرفته است و تمرکز آنها اغلب روی فراسنجه عمق آبشستگی در شرایط قرارگیری لوله روی بستر بوده است. هدف از این ارزیابی بررسی تأثیر عمق کارگذاری لوله عبوری از عرض رودخانه در جریان ماندگار بر تغییر پذیری‌های زمانی الگوی آبشستگی و رسوبگذاری پیرامون خط لوله (بیشینه عمق آبشستگی، پیش‌روی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به مرکز لوله به سمت پایین دست، طول چاله آبشستگی، ارتفاع پشته رسوبگذاری شده در پایین دست لوله و میزان پیش‌روی ارتفاع پشته رسوبی نسبت به مرکز لوله) به کمک پردازش اطلاعات از فیلم‌برداری در طول هر آزمایش بود. در این بررسی از لوله‌هایی به قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر استفاده شد. لوله‌ها در عمق‌های یک چهارم قطر لوله زیر بستر ($e/D=0.25$)، روی بستر ($e/D=0$)، یک چهارم قطر لوله بالای بستر ($e/D=0.25$) و نصف قطر لوله بالای بستر ($e/D=0.5$) نصب شدند.

۲- مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز در یک فلوم مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۷۴ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. جنس دیواره‌های فلوم از شیشه و جنس کف از فولاد بود. فلوم دارای مخزن‌هایی در ابتدا و انتها و قسمتی برای آرام کردن جریان بود. شکل ۱ نمایی از فلوم مورد استفاده، محل نصب لوله، محدوده فرسایش پذیر بستر را نشان می‌دهد.

میزان جریان عبوری از فلوم به‌طور پیوسته توسط یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۲۵ درصد میزان اندازه‌گیری شده که در مجرای ورودی فلوم نصب شده، اندازه‌گیری می‌شد. برای بررسی پدیده آبشستگی در پیرامون لوله عبوری از عرض مجرا، رسوب‌هایی با اندازه میانگین (d_{50}) ۰/۷ میلی‌متر، چگالی نسبی (S_g) ۲/۶۵ و انحراف معیار استاندارد (σ_g) ۱/۴ درون

کردند. آنان عمق و طول آبشستگی را برای اندازه میانگین رسوب‌ها ۱/۸ و ۰/۷۲ میلی‌متر به‌دست آوردند. آنان بیان کردند که عمق آبشستگی نهایی با افزایش عمق جریان در آب‌های کم‌عمق افزایش می‌یابد و برای عمق جریان بیشتر از پنج برابر قطر لوله، عمق جریان تأثیری بر روی عمق آبشستگی نخواهد داشت. (Dey and Singh (2007) آزمون‌های چندی را برای محاسبه بیشترین عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله در شرایط جریان ماندگار و با وجود نشت رو به بالا انجام دادند. آنان در تحقیقات خود از پنج قطر مختلف لوله و چهار اندازه مختلف مواد بستری استفاده کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که به‌طور کلی عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله با نشت رو به بالا، کمتر از حالت بدون نشت است. (Wu and Chiew (2013) به بررسی چاله آبشستگی و میدان جریان پیرامون یک خط لوله در جریان ماندگار پرداختند. میدان جریان در این آزمایش‌ها توسط یک سرعت‌سنج صوتی اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد وجود گردابه‌های ناشی از اختلاف فشار ایجاد شده در بالادست و پایین‌دست لوله سبب شکل‌گیری نیرویی برای حرکت و جابه‌جایی رسوب‌ها می‌شود. همچنین ورود جریان از زیر لوله به درون چاله آبشستگی سبب گسترش بیشتر آن می‌شود. (Azmathullah et al. (2014) برای بررسی تأثیر زاویه برخورد خطوط جریان با خط لوله بر آبشستگی زیر آن چهار زاویه ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که تغییر زاویه خط لوله نسبت به جریان باعث جابه‌جایی چاله آبشستگی به سمت دیواره آبراهه می‌شود. همچنین تغییر زاویه خط لوله تأثیر چندانی بر بیشینه عمق آبشستگی نداشت. Zhao et al. (2015) به بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشستگی زیر دو خط لوله متوالی و با فاصله‌ها مختلف از هم پرداختند. در شرایط بستر متحرک مشاهده شد که عمق چاله آبشستگی زیر لوله بالادستی نسبت به لوله منفرد اندکی بیش‌تر بود، درحالی‌که عمق چاله آبشستگی زیر لوله پایین‌دستی نسبت به لوله منفرد خیلی بیش‌تر بود. بنابر مشاهده‌های این تحقیق، چاله آبشستگی در حالت آب زلال نسبت به حالت بستر متحرک دارای عمق بیشتری بود. در ضمن با نزدیک‌تر شدن دو خط لوله به یکدیگر بیشینه عمق چاله آبشستگی زیر آنها کاهش می‌یافت. Yan et al. (2020) آبشستگی موضعی پیرامون خط لوله عبوری از عرض رودخانه را در شرایط جریان ماندگار به صورت عددی

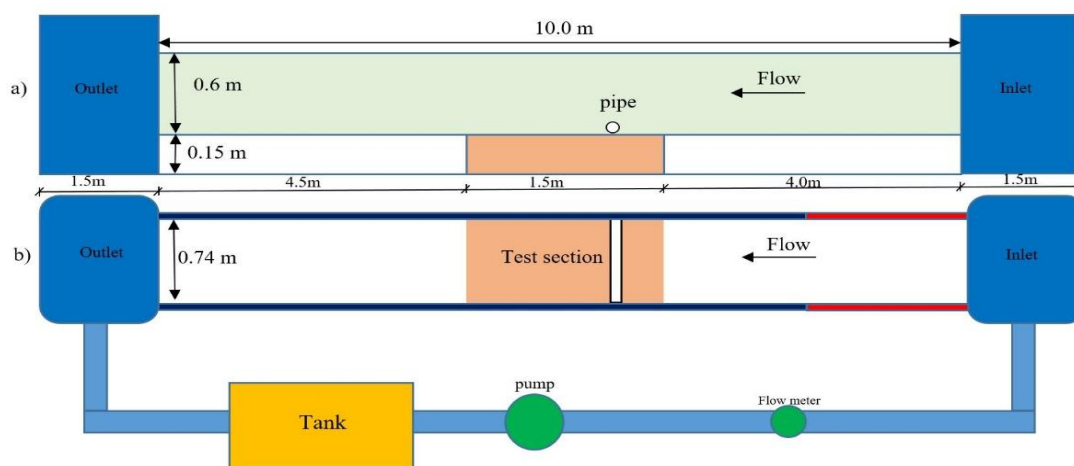


Fig. 1 View of the laboratory flume used in this research, a) Side view, b) Plan view.

شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، الف) نمای جانبی، ب) نمای پلان.

در این تحقیق لوله‌هایی به قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر در عمق‌های یک چهارم قطر لوله زیر بستر ($e/D = -0.25$)، روی بستر ($e/D = 0$)، یک چهارم قطر لوله بالای بستر ($e/D = 0.25$) و نصف قطر لوله بالای بستر ($e/D = 0.5$) استفاده شدند (e برابر فاصله زیر لوله نسبت به بستر رسوبی و D برابر قطر لوله می‌باشد). شکل ۳ عمق‌های کارگذاری لوله را به صورت نمای کلی نشان می‌دهد. جنس لوله‌ها از PVC بود که در همه آزمایش‌ها به صورت عمود بر جریان در عرض فلوم نصب شدند. در حین آزمایش و در بازه‌های زمانی مختلف عمق آبستنگی زیر لوله توسط یک دوربین با قابلیت تصویربرداری ۶۰ فریم در ثانیه که در کنار فلوم قرار داشت، خوانش می‌شد. آزمایش‌ها به ازای دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه، عدد فرود ۰/۲۶ و عمق جریان ۱۴ سانتی‌متر صورت گرفت. مدت زمان انجام همه آزمایش‌ها ۱۲۰ دقیقه انتخاب شد. شمار کل آزمایش‌ها ۱۲ عدد بود. در این آزمایش‌ها شرایط آب زلال حاکم بود و بیشینه سرعت میانگین جریان ورودی (V) برابر ۰/۹۵ سرعت آستانه حرکت رسوبات (V_c) در نظر گرفته شد تا شرایط آبستنگی آب زلال برقرار شود. در جدول ۱ ویژگی‌های آزمایش‌های این تحقیق ارائه شده است.

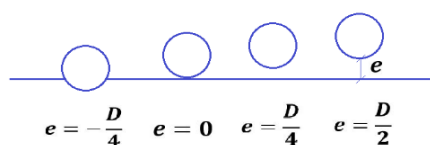


Fig. 3 Schematic figure of pipe installation depths.

شکل ۳ نمای کلی عمق‌های کارگذاری لوله.

محدوده فرسایش پذیر و به عمق ۱۵ سانتی‌متر ریخته شد. طول محدوده فرسایش پذیر ۱/۵ متر بود و در فاصله ۴ متر از ابتدای فلوم قرار داشت. برای از بین بردن تلاطم و انرژی مزاد جریان ورودی به فلوم آزمایشگاهی از دو صفحه‌ی مشبک فلزی استفاده شد. در فلوم مورد آزمایش برای یافتن محل مناسب برای محدوده‌ی رسوبی و نصب لوله متقاطع، رخ‌نمای سرعت توسط دستگاه سرعت سنج سه بعدی الکترومغناطیس JFE ALEC برداشت شد. نخستین مقطع به فاصله‌ی ۳ متر از ابتدای فلوم و مقطع‌های بعدی هرکدام به فاصله‌ی نیم متر از مقطع پیشین برداشت شدند. همان‌گونه که از رخ‌نماهای رسم شده در شکل ۲ مشخص است، سازگاری رخ‌نماهای سرعت برداشت شده از ۳ متر به بعد نشان دهنده‌ی توسعه یافتگی کامل لایه‌ی مرزی در فلوم است. محل نصب لوله متقاطع، ۴/۵ متر از ابتدای فلوم بود.

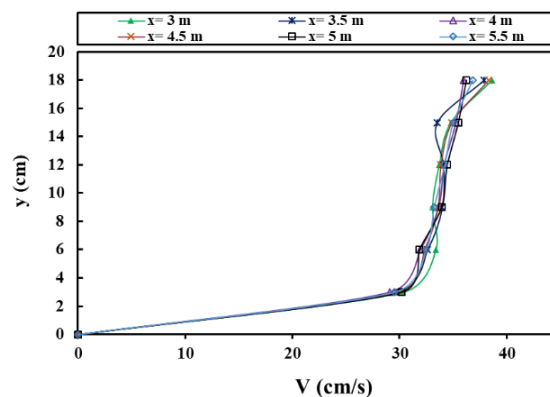


Fig. 2 Depth velocity distribution at different distances from the flume inlet.

شکل ۲ پراکنش عمقی سرعت در فاصله‌های مختلف از ورودی فلوم.

که میزان قابل توجهی از جریان وارد آن می‌شود. این مسئله باعث افزایش سریع تنش برشی زیر خط لوله تا بیش از سه برابر تنش برشی جریان نزدیک شونده می‌شود (Jensen et al., 1990). در نتیجه میزان زیادی از رسوب‌ها زیر خط لوله دچار آبشستگی شده و شکاف به وجود آمده بزرگ‌تر شده و مخلوط آب و رسوب از آن خارج می‌شود. با افزایش اندازه شکاف، سرعت در شکاف کاهش یافته و پایبندگی به تدریج متوقف می‌شود. به دنبال فرسایش تونلی، فرم بستر در پایین دست لوله تشکیل شده و به تدریج به سمت پایین دست حرکت می‌کند. در این مرحله آبشستگی در نتیجه حضور گردابه‌های تشکیل شده در پایین دست لوله ادامه می‌یابد. شکل ۴ الگوی آبشستگی و رسوبگذاری پیرامون لوله را نشان می‌دهد. با توجه به نرخ شدید آبشستگی در ابتدای آزمایش‌ها، تغییر پذیری‌های زمانی عمق آبشستگی (d_s)، ارتفاع پشته رسوبگذاری در پایین دست لوله (H_p)، پیش‌روی عمق آبشستگی (X_{HS})، پیش‌روی ارتفاع پشته رسوبگذاری نسبت به مرکز لوله (X_{HP}) و طول چاله‌ی آبشستگی (S_1) بررسی شد. شکل ۵ فراسنجه‌های مورد بحث در این بررسی را به صورت نمای کلی نمایش می‌دهد.

۳-۱- عمق آبشستگی (d_s)

شکل ۶ تغییرات زمانی عمق آبشستگی را برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد. نتایج این شکل نشان می‌دهد که برای هر یک از اعماق کارگذاری، روند آبشستگی، رفتار مختص خود را دارد. به عنوان مثال در عمق کارگذاری $e/D=0.5$ برای هر سه قطر مورد آزمایش، در لحظات ابتدایی شیب تغییرات آبشستگی بسیار زیاد بود و بخش قابل توجهی از توسعه‌ی عمق آبشستگی

جدول ۱ ویژگی‌ها آزمایش‌ها.

Table 1 Specification of Experiments.

Row	D(mm)	e/D
1	20	-0.25
2	40	-0.25
3	60	-0.25
4	20	0
5	40	0
6	60	0
7	20	0.25
8	40	0.25
9	60	0.25
10	20	0.5
11	40	0.5
12	40	0.5

۳- نتایج و بحث

در پیرامون سازه‌هایی که در مسیر جریان رودخانه قرار می‌گیرند همواره آبشستگی روی می‌دهد. میزان و گسترش آبشستگی به شرایط جریان و شرایط هندسی سازه‌ی مورد نظر بستگی دارد. هنگامی یک خط لوله در تقاطع با رودخانه قرار گرفته و از بستر رودخانه عبور می‌کند نیروی آب‌پویایی و گرادیان فشار بین دو سمت لوله باید مورد بررسی قرار بگیرد. با برقراری جریان، گرادیان فشار بین دو سمت لوله به وجود می‌آید. این گرادیان فشار بین بالادست و پایین دست لوله سبب ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که موجب آبشستگی در زیر و پیرامون خط لوله می‌شوند. در این شرایط رسوب‌ها زیر لوله آغاز به جوشش می‌کنند که به این حالت آستانه آبشستگی گفته می‌شود (Sumer and Fredsoe, 2002). در نهایت سطح رسوب زیر لوله گسیخته می‌شود که به این حالت پایبندگی می‌گویند. پس از پایبندگی یک شکاف کوچک بین خط لوله و بستر بوجود می‌آید

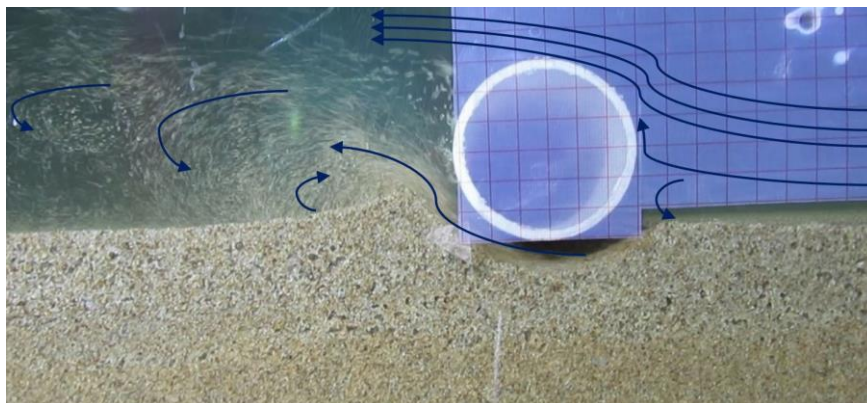


Fig. 4 Scouring and sedimentation pattern around the pipe.

شکل ۴ الگوی آبشستگی و رسوبگذاری پیرامون لوله.

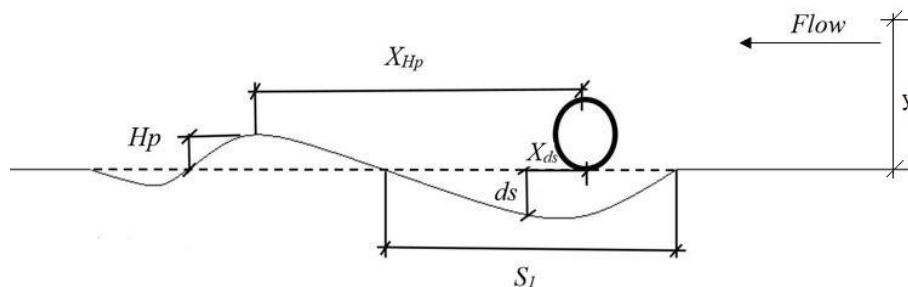


Fig. 5 Schematic of the parameters discussed in this study.

شکل ۵ فراسنجه‌های مورد بحث در این بررسی به صورت نمای کلی.

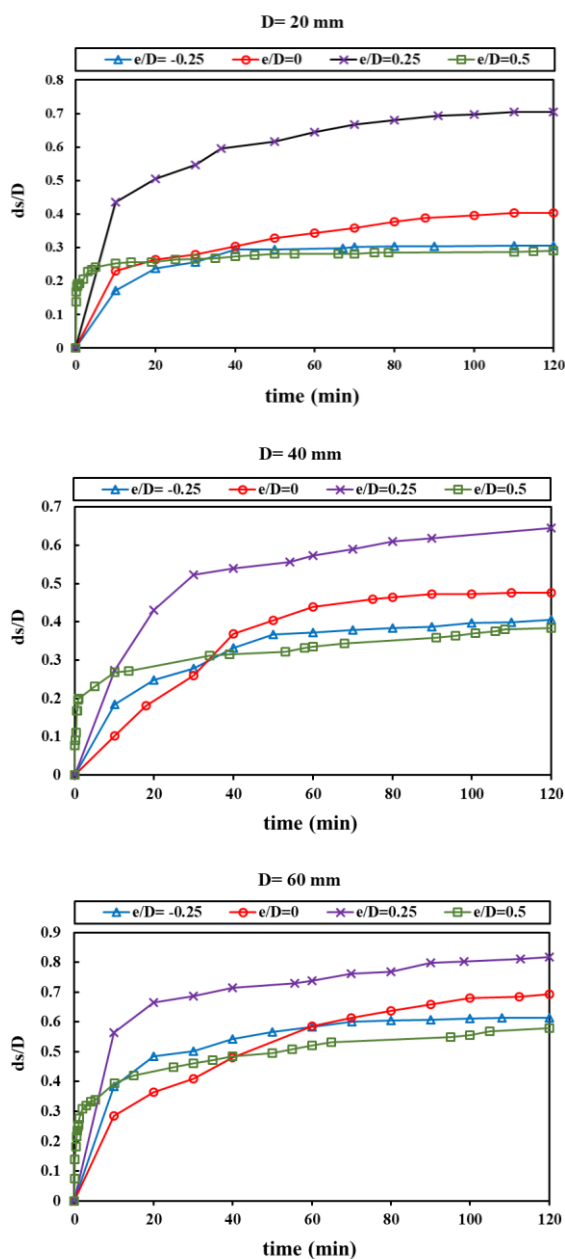


Fig. 6 Temporal scour depth for different diameters and installation depth of pipe.

شکل ۶ تغییرات زمانی عمق آبستگي برای عمق‌های کارگذاری و قطرهای مختلف لوله

در همان ابتدای آزمایش روی داد. از مقایسه‌ی هر یک از اعماق کارگذاری نتیجه شد که در عمق کارگذاری $e/D = 0.5$ میزان عمق آبستگي در ۵ دقیقه‌ی نخست نزدیک به ۸۳ درصد عمق آبستگي نهایی بود. در عمق کارگذاری $e/D = 0.25$ عمق آبستگي در یک ساعت آغازین آزمایش‌ها حدود ۹۰ درصد عمق آبستگي نهایی روی داد. در این عمق کارگذاری برخلاف عمق کارگذاری $e/D = 0.5$ منحنی پیشرفت زمانی عمق آبستگي شیب ملایم تری داشت. به‌طورکلی نتایج شکل ۶ نشان داد که بیشترین عمق آبستگي در عمق کارگذاری $e/D = 0.25$ رخ داده است. پس از آن عمق کارگذاری $e/D = 0$ دارای بیشترین میزان آبستگي بود. به طوری که ۸۰ تا ۹۰ درصد از آبستگي در ۴۰ دقیقه آغازین هر آزمایش صورت گرفت. عمق کارگذاری $e/D = 0.5$ دارای کمترین میزان عمق آبستگي نسبت به سایر عمق‌های کارگذاری بود ولی توسعه‌ی زمانی این عمق کارگذاری نسبت به دیگر عمق‌های کارگذاری سریع‌تر بود. نتایج مربوط به عمق آبستگي (ds) برای حالت‌های مختلف، بدین شرح است که به ترتیب $e/D = 0.25$ ، $e/D = 0$ ، $e/D = -0.25$ ، $e/D = 0.5$ از بیشترین به کمترین عمق آبستگي را داشتند. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، با افزایش قطر لوله، اثر عمق کارگذاری کمتر می‌شد.

در صورت مقایسه این بررسی آزمایشگاهی با دیگر بررسی‌های انجام شده در رابطه با بررسی قطر و عمق کارگذاری، یکی از مرتبط‌ترین بررسی‌ها، توسط (Ataieyan (2012) است. در این ارزیابی به بررسی آبستگي زیر خط لوله با تاکید بر اثر عمق کارگذاری پرداخته شده است. به گونه‌ای که در عمق کارگذاری بالای بستر به اندازه‌ی یک‌چهارم قطر لوله بیشترین آبستگي مشاهده شد. نتیجه به‌دست از آزمایش‌های انجام شده در این بررسی نیز موید این نکته است که در عمق کارگذاری $e/D = 0.25$

روندی یکسان با میزان‌های نزدیک به هم را دنبال کردند. در صورت مقایسه کلی منحنی‌های ترسیم شده، مشاهده شد که عمق آبستتگی بی‌بعد برای عمق کارگذاری $e/D=0.25$ ، دارای بیشترین میزان بود. در این عمق‌های کارگذاری خطوط جریان نزدیک شونده به لوله و عبوری از زیر لوله دارای جمع شدگی بالایی بوده که به تناسب آن تنش وارد بر بستر در مقایسه با دیگر حالت‌ها افزایش یافت و در نتیجه موجب فرسایش بیشتری شد. در عمق کارگذاری $e/D=0.5$ به‌رغم فاصله‌ی لوله از بستر، عمق آبستتگی کمتری مشاهده شد، که در مقایسه با عمق کارگذاری $e/D=0.25$ گردابه‌های به‌وجود آمده در نتیجه تنگ شدگی کمتر، شدت کمتری داشتند.

۳-۲- فاصله طولی موقعیت بیشینه عمق آبستتگی نسبت به مرکز لوله (X_{ds})

یکی دیگر از فراسنجه‌های مورد بررسی مربوط به آبستتگی، میزان فاصله طولی موقعیت حداکثر عمق آبستتگی نسبت به مرکز لوله است. این فراسنجه با X_{ds} نشان داده شده است. مرکز لوله به عنوان مبدا مختصات انتخاب شد. نتایج به‌دست آمده از این بررسی‌ها را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. در عمق کارگذاری $e/D=-0.25$ و برای قطر ۲۰ میلی‌متر، بیشینه عمق از زیر لوله جابه‌جا نشد و میزان X_{ds} برابر صفر بود. در قطر لوله‌ی ۴۰ میلی‌متر می‌توان دریافت X_{ds} در آغاز با شدت زیاد، به مدت ۱۰ دقیقه پس‌روی به سمت بالادست داشت. پس از گذشت ۱۰ دقیقه از آغاز آزمایش، X_{ds} با سرعت کم دوباره به مرکز لوله نزدیک شد. در زمان ۸۰ دقیقه از آغاز آزمایش، بیشینه عمق آبستتگی دقیقاً به زیر لوله رسید و از آن پس تا پایان آزمایش جابجا نشد. برای قطر لوله‌ی ۶۰ میلی‌متر نیز پس‌روی به سمت بالادست تا زمان ۱۰ دقیقه مشاهده شد. با این تفاوت که میزان پس‌روی به سمت بالادست نسبت به قطر لوله‌ی ۴۰ میلی‌متر به میزان ۳۶ درصد کمتر بود. پس از گذشت ۱۰ دقیقه از آغاز آزمایش، منحنی تغییر پذیری‌های X_{ds} با شیب به نسبت زیادی در مقایسه‌ی با لوله‌ی ۴۰ میلی‌متر پیش‌روی کرد تا در زمان ۳۰ دقیقه به زیر لوله رسید. پس از آن و تا پایان آزمایش به پیش‌روی به سمت پایین دست ادامه داد. در پایان آزمایش به بالاترین میزان خود، نسبت به مرکز لوله رسید.

به‌علت ایجاد تنگ‌شدگی در یک فاصله‌ی مشخص بین زیر لوله و سطح بستر رسوبی و شکل گرفتن گردابه‌های عمودی و افقی، بیشترین میزان بیشینه عمق آبستتگی در مقایسه با دیگر عمق‌های کارگذاری دیده شد.

نتایج آزمایشگاهی حاصل از ۱۲ آزمایش برای سه قطر لوله و چهار عمق کارگذاری در شکل ۷ نشان داده شده است. محور قائم بیانگر بیشینه عمق آبستتگی بی‌بعد و محور افقی نشان دهنده‌ی عمق استغراق نسبی (y/D) است. نتایج نشان داد که در عمق‌های استغراق زیاد، قطر لوله روی فرسایش تاثیر کمی داشت، به‌گونه‌ای که در قسمت انتهایی نمودار به ازای نسبت‌های استغراق زیاد، روند نمودار به‌صورت نزولی و آنگاه به شکل افقی با شیب بسیار کم درآمد. شیب تغییر پذیری‌های عمق آبستتگی بی‌بعد نسبت به عمق استغراق نسبی در عمق‌های کمتر از $3/5$ بسیار زیاد بود. پس از عمق استغراق نسبی $3/5$ ، کاهش تدریجی شیب نمودار آبستتگی نسبی دیده شد. هر یک از عمق‌های کارگذاری لوله در $e/D=0$ ، $e/D=-0.25$ و $e/D=0.5$ روندی یکسان را دنبال کردند. در عمق کارگذاری $e/D=0.25$ که دارای بیشترین آبستتگی نسبی نسبت به دیگر عمق‌های کارگذاری بود و روند متفاوتی دنبال شد. در این عمق کارگذاری با افزایش میزان y/D تا $3/5$ ، آبستتگی نسبی به‌صورت نزولی تغییر کرد. با افزایش عمق استغراق نسبی (که بیانگر کاهش قطر لوله است) و گذر از $3/5$ ، عمق آبستتگی نسبی ازدیاد یافت. منحنی‌های ترسیم شده، برای عمق‌های کارگذاری $e/D=0.5$ و $e/D=-0.25$

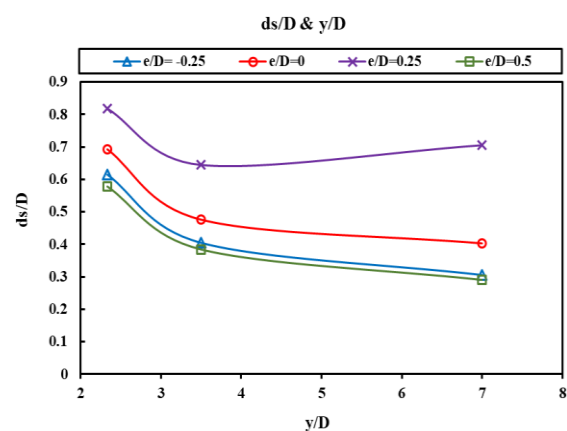


Fig. 7 Dimensionless diagram of the maximum scour depth under the pipe relative to the relative immersion depth.

شکل ۷ نمودار بی‌بعد بیشینه عمق آبستتگی زیر لوله نسبت به عمق استغراق نسبی

مسافت بیشتری را از محل بیشینه عمق طی می‌کردند. با کاهش تاثیر گردابه‌های افقی محل رخداد بیشینه عمق به سمت بالادست لوله متمایل می‌شد. این پدیده را در دیگر عمق‌های کارگذاری $e/D=0.25$ و $e/D=0.5$ ، با شدت و زمان روی دادن متفاوت می‌توان دید. باتوجه به اینکه در عمق‌های کارگذاری لوله بالای بستر، یک فضای خالی بین لوله و بستر وجود دارد، در نتیجه جریان امکان عبور از آن ناحیه را به راحتی پیدا کرده و گردابه‌های ناشی از جریان عبوری از زیر لوله و گردابه پایین رونده، موجب به عقب رانده شدن عمق آبشستگی به سمت بالادست می‌شوند. ولی در شرایط قرارگیری لوله روی بستر، الگوی جریان برخوردی با لوله به گونه‌ای است که گردابه‌ها برای ایجاد روزنه زیر لوله تلاش می‌کنند و موجب رانده شدن عمق آبشستگی به سمت پایین دست می‌شوند. از این رو برای عمق کارگذاری $e/D=0$ در هیچ یک از قطرهای لوله پس‌روی به سمت بالادست رخ نداد و در همه‌ی حالت‌های، بیشینه عمق آبشستگی از زیر لوله شروع شد و برای هر یک از قطرهای لوله تنها پیش‌روی به سمت پایین‌دست مشاهده شد. به‌طوری‌که برای قطر لوله‌ی ۶۰ میلی‌متر، میزان پیش‌روی به سمت پایین‌دست نسبت به قطر لوله‌ی ۴۰ میلی‌متر، ۷۸ درصد بیش‌تر و نسبت به قطر لوله‌ی ۲۰ میلی‌متر حدود ۹۰ درصد بیشتر بود. برای هر دو عمق کارگذاری $e/D=0.25$ و $e/D=0.5$ پس‌روی به سمت بالادست رخ داد. به گونه‌ای که در عمق کارگذاری $e/D=0.25$ ، هرچه قطر لوله افزایش می‌یابد، میزان پس‌روی به سمت بالادست با سرعت بیشتری رخ داد. بیشترین میزان پس‌روی به سمت بالادست در قطر ۶۰ میلی‌متر در زمان ۲۰ دقیقه، در قطر ۴۰ میلی‌متر نزدیک به ۳۰ دقیقه و در قطر ۲۰ میلی‌متر در زمان ۳۸ دقیقه روی داد. بیشینه میزان پیش‌روی به سمت پایین‌دست مانند دیگر حالت‌های مربوط به قطر لوله‌ی ۶۰ میلی‌متر بود که میزان آن نسبت به دیگر قطرها از ۲۷ تا ۵۲ درصد متغیر بود. در عمق کارگذاری $e/D=0.5$ ، بیشترین میزان پیش‌روی بیشینه عمق آبشستگی به سمت پایین‌دست نسبت به همه‌ی حالت‌ها مشاهده شد. نتایج مربوط به فاصله طولی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به مرکز لوله (X_{ds}) برای حالت‌های مختلف، بدین شرح است که به‌ترتیب $e/D=0.5$ ، $e/D=0.25$ ، $e/D=0$ ، $e/D=-0.25$ از بیشترین به کمترین میزان را داشتند.

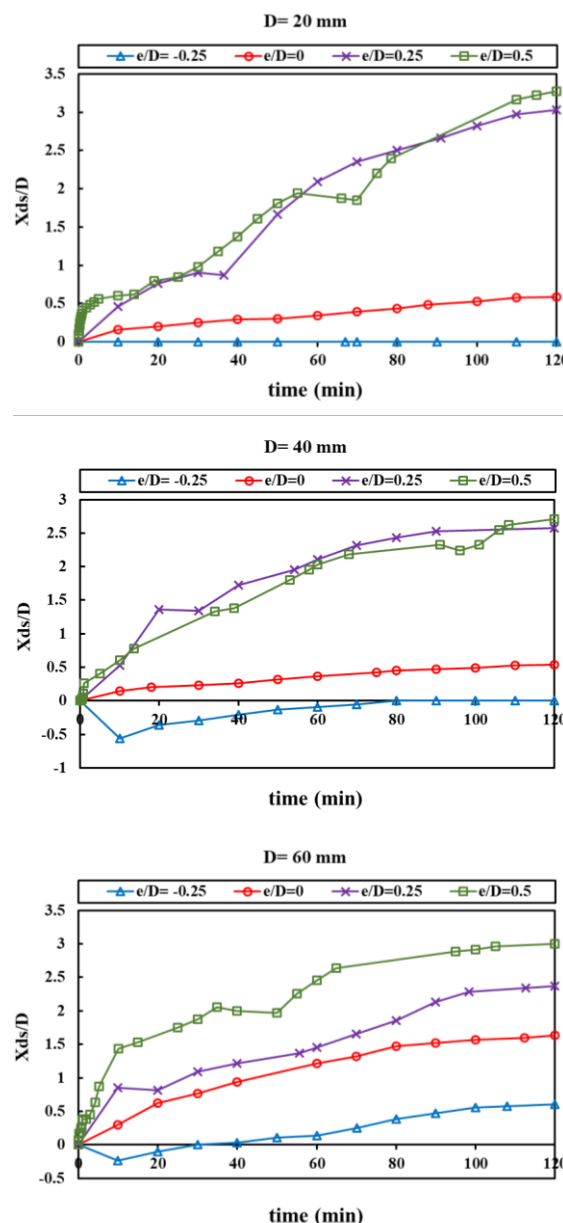


Fig. 8 Temporal scour depth development for different diameters and installation depth of pipe.

شکل ۸ تغییر پذیری‌های زمانی جابه‌جایی عمق آبشستگی نسبت به مرکز لوله برای عمق‌های کارگذاری و قطرهای مختلف لوله

با توجه به مطالب یاد شده محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی در آغاز آزمایش به سمت بالادست لوله حرکت می‌کرد. با افزایش ابعاد چاله‌ی آبشستگی میزان قدرت جریان پایین‌رونده تقویت می‌شد، به‌طوری‌که با عمیق‌تر شدن بیشینه عمق آبشستگی در چاله، تاثیر جریان بالادست برای انحراف جریان در عمق‌های پایین در محل روی دادن عمق بیشینه، کمتر می‌شد. به‌عبارت دیگر گردابه‌های عمودی در عمق، قوی‌تر و گردابه‌های افقی

را داشتند.

۳-۳- طول چاله‌ی آبشستگی (S1)

این فراسنجه آبشستگی از شروع حفره‌ی آبشستگی پیش از لوله تا پایان این حفره پس از لوله، به‌ازای شرایط مختلف آزمایش دارای میزان‌های متفاوت بود.

۳-۴- ارتفاع پشته‌ی رسوبی تشکیل شده در پایین دست لوله (H_p)

از جمله فراسنجه‌هایی که در آبشستگی پیرامون خطوط لوله عبوری از عرض رودخانه‌ها می‌تواند با اهمیت باشد. ارتفاع پشته‌ی رسوبی تشکیل شده ناشی از آبشستگی، در پایین دست لوله و میزان پیش‌روی این فراسنجه نسبت به مرکز لوله می‌باشد. در شکل ۱۰ تغییرات زمانی ارتفاع پشته رسوبگذاری شده (H_p)، در آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است. با مشاهده این شکل می‌توان به این نتیجه دست یافت که به‌طور کلی در همه‌ی آزمایش‌ها، نزدیک به ۸۰ تا ۹۰ درصد ارتفاع پشته رسوبگذاری در ۱۰ الی ۲۰ دقیقه‌ی آغازین هر آزمایش رخ داد و پس از آن روند تغییر پذیری‌ها ارتفاع پشته رسوبگذاری، متناسب با عمق کارگذاری و قطر لوله، سیر متفاوتی را در آزمایش‌های مختلف طی کرد. نتایج مربوط به عمق کارگذاری e/D = -0.25 نشان داد که برای هر سه قطر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر، ارتفاع پشته رسوبگذاری (H_p) در آغاز افزایش و پس از آن کاهش یافت. برای مثال در قطر ۲۰ میلی‌متر، بیشینه H_p در ۱۰ دقیقه‌ی آغازین آزمایش روی داد. پس از آن و با گذشت زمان، H_p به تدریج کاهش یافت. در قطر ۴۰ میلی‌متر، حدود ۷۸ درصد H_p در ۱۰ دقیقه‌ی آغاز رخ داد. پس از آن H_p به تدریج افزایش پیدا کرد و پس از گذشت یک ساعت از آغاز آزمایش به بیشینه میزان خود رسید و پس از آن، کاهش H_p آغاز شد به‌طوری که در پایان آزمایش به میزان نهایی خود رسید و این میزان در مقایسه با لوله‌ی ۲۰ میلی‌متر، ۵۷ درصد بیشتر بود. نتایج مربوط به عمق کارگذاری e/D = 0 نشان داد که برای قطرهای ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر، روند تغییر پذیری‌های H_p افزایشی بود. اما در قطر ۲۰ میلی‌متر همانند دیگر قطرها، حدود ۸۰ درصد H_p در ۱۰ دقیقه‌ی آغازین رخ داد. پس از آن H_p به تدریج افزایش پیدا کرد و پس از گذشت یک ساعت از آغاز آزمایش به بیشینه میزان خود رسید. پس از آن H_p کاهش یافت.

میزان ارتفاع پشته رسوبگذاری برای قطرهای ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر، به‌ترتیب به میزان ۶۰ و ۶۶ درصد بیش از قطر ۲۰ میلی‌متر بود. چاله‌ی تشکیل شده پس از پشته رسوبی یکی فراسنجه‌هایی است که به‌علت اختلاف فشار بالادست و پایین دست پشته و

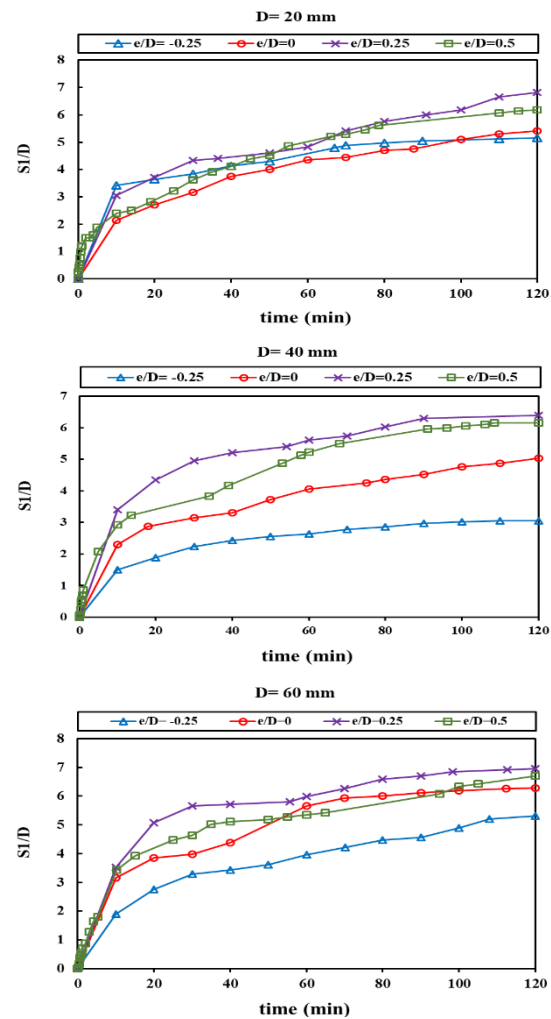


Fig. 9 Temporal changes of the scour hole length in different experiments.

شکل ۹ تغییر پذیری‌ها زمانی طول چاله‌ی آبشستگی در آزمایش‌های مختلف.

آنچه در منحنی‌های رسم شده در شکل ۹ مشخص است، در عمق‌های کارگذاری e/D = 0.5، e/D = 0.25 و e/D = 0 در یک ساعت آغازین آزمایش، بین ۸۰ تا ۹۰ درصد بیشینه میزان نهایی طول چاله‌ی آبشستگی تشکیل شد. میزان نهایی S1 برای قطر ۶۰ میلی‌متر به‌طور میانگین ۶۵ درصد بیشتر از قطرهای ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر بود. میزان‌های نهایی مربوط به S1 در عمق‌ها کارگذاری مختلف، بدین شرح است که به‌ترتیب e/D = 0.25، e/D = 0.5، e/D = 0 و e/D = -0.25 از بیشترین به کمترین میزان

شده در پایین دست پشته رسوبی، به گونه‌ای بود که هرچه ارتفاع پشته رسوبی بلندتر می‌شد، ابعاد چاله هم بزرگ‌تر می‌شد. بررسی ارتفاع پشته رسوبگذاری در پایین دست لوله برای عمق‌های کارگذاری $e/D=0.25$ و $e/D=0.5$ نشان داد که در قطر ۲۰ میلی متر، H_p همواره سیر افزایشی را دنبال کرد در صورتی که در قطرهای ۴۰ و ۶۰ میلی متر آغاز افزایشی و پس از آن کاهش می‌یابد. نتایج نهایی مقایسه‌ای H_p برای حالت‌های مختلف، بدین شرح است که به ترتیب $e/D=0.25$ ، $e/D=0.5$ ، $e/D=0$ از بیشترین به کمترین میزان را داشتند.

۳-۵- میزان جابه‌جایی ارتفاع پشته‌ی رسوبی نسبت به مرکز لوله (X_{HP})

بیشینه ارتفاع پشته‌ی رسوبی نیز همانند بیشینه عمق آبستگي، در طول زمان آزمایش نسبت به مرکز لوله جابه‌جا می‌شد که در این بخش به آن پرداخته شد (شکل ۱۱). در عمق‌های کارگذاری $e/D=0$ و $e/D=-0.25$ روند تغییر پذیری X_{HP} با شیب به نسبت ملایم (بر خلاف روند تغییر پذیری H_p که عمده آن در ابتدای آزمایش روی داد) افزایشی بود. لوله‌های ۲۰ و ۴۰ میلی متر در عمق‌های کارگذاری $e/D=0.25$ و $e/D=0.5$ روند همانندی را دنبال کردند. از سویی گردابه‌های شدید ایجاد شده ناشی از قرارگیری لوله‌های با قطرهای بزرگ‌تر در عمق‌های کارگذاری بالاتر نسبت به بستر، پیش‌روی X_{HP} به سمت پایین دست را تشدید کردند. میزان‌های نهایی X_{HP} در عمق‌های کارگذاری $e/D=0.25$ و $e/D=0.5$ برای قطرهای ۴۰ و ۶۰ میلی متر، بین ۴۸ تا ۵۰ درصد نسبت به لوله‌ی ۲۰ میلی متر بیشتر بود. نتایج نهایی X_{HP} برای حالت‌های مختلف، بدین شرح است که به ترتیب $e/D=0$ ، $e/D=0.25$ ، $e/D=0.5$ ، $e/D=0$ از بیشترین به کمترین میزان را داشتند.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر عمق کارگذاری لوله عبوری از عرض رودخانه بر تغییر پذیری‌های زمانی فراسنجه‌های آبستگي و رسوبگذاری پیرامون آن در شرایط جریان ماندگار می‌باشد. بدین جهت داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که در همه عمق‌های کارگذاری، ۸۰ تا ۹۰ درصد از عمق آبستگي

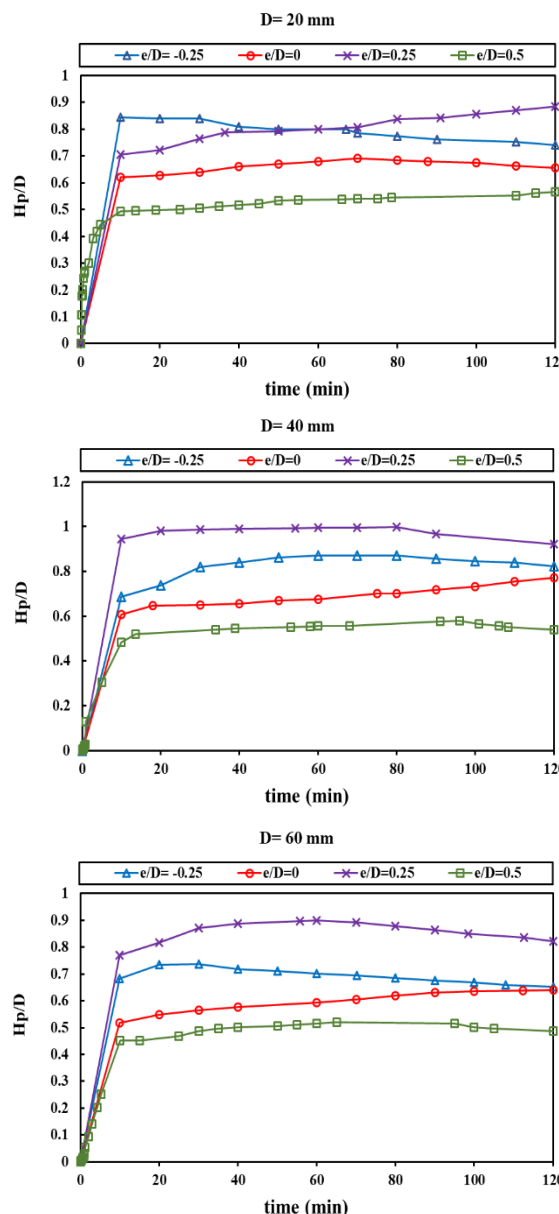


Fig. 10 Temporal Sediment ridge height for different diameters and installation depth of pipe.

شکل ۱۰ تغییر پذیری‌های زمانی ارتفاع پشته رسوبگذاری برای عمق‌های کارگذاری و قطرهای مختلف لوله

تشکیل گردابه قائم با محور افقی در پایین دست پشته تشکیل شد. این فراسنجه با عنوان چاله‌ی ثانویه در عمق‌های کارگذاری $e/D=0.25$ و $e/D=0.5$ و $e/D=-0.25$ برای لوله‌های به قطر ۴۰ و ۶۰ میلی متر دیده شد. در عمق کارگذاری $e/D=0$ لوله‌ی به قطر ۲۰ میلی متر هیچ گونه تشکیل چاله‌ی ثانویه‌ای دیده نشد. از سویی ارتباط بین پشته رسوبی تشکیل شده در پایین دست لوله و چاله‌ی ثانویه تشکیل

ارتفاع رسوبگذاری به ترتیب در عمق‌های کارگذاری $e/D=0.5$ و $e/D=0.25$ رخ داد. در ۱۰ دقیقه‌ی آغازین هر آزمایش، ارتفاع پشته رسوبگذاری به حدود ۸۰ درصد میزان نهایی خود رسید.

۵- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می‌شود.

۶- فهرست نشانه‌ها

e	فاصله‌ی زیر لوله تا سطح بستر (L)
D	قطر لوله (L)
d_{50}	اندازه میانگین رسوب (L)
S_g	چگالی نسبی رسوب (-)
σ_g	انحراف معیار استاندارد رسوب (-)
y	عمق جریان (L)
V	سرعت میانگین جریان (L/T)
V_c	سرعت آستانه حرکت رسوب (L/T)
Q	دبی جریان (L ³ /T)
Fr	عدد فرود (-)
ds	عمق آبشستگی (L)
X_{ds}	فاصله طولی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به مرکز لوله (L)
H_p	ارتفاع پشته‌ی رسوبی تشکیل شده در پایین دست لوله (L)
X_{Hp}	میزان جابه‌جایی ارتفاع پشته‌ی رسوبی نسبت به مرکز لوله (L)
S_1	طول چاله‌ی آبشستگی (L)

۷- منبع‌ها

Ataieyan, A. (2012). Prediction of local scour depth below an underwater pipeline in a river crossing, MSc Thesis, Urmia University, 176p.

Azamathulla, H.M., Yusoff, M.A.M. and Hasan, Z.A. (2014). Scour below submerged skewed pipeline. Journal of Hydrology, 509, 615-620.

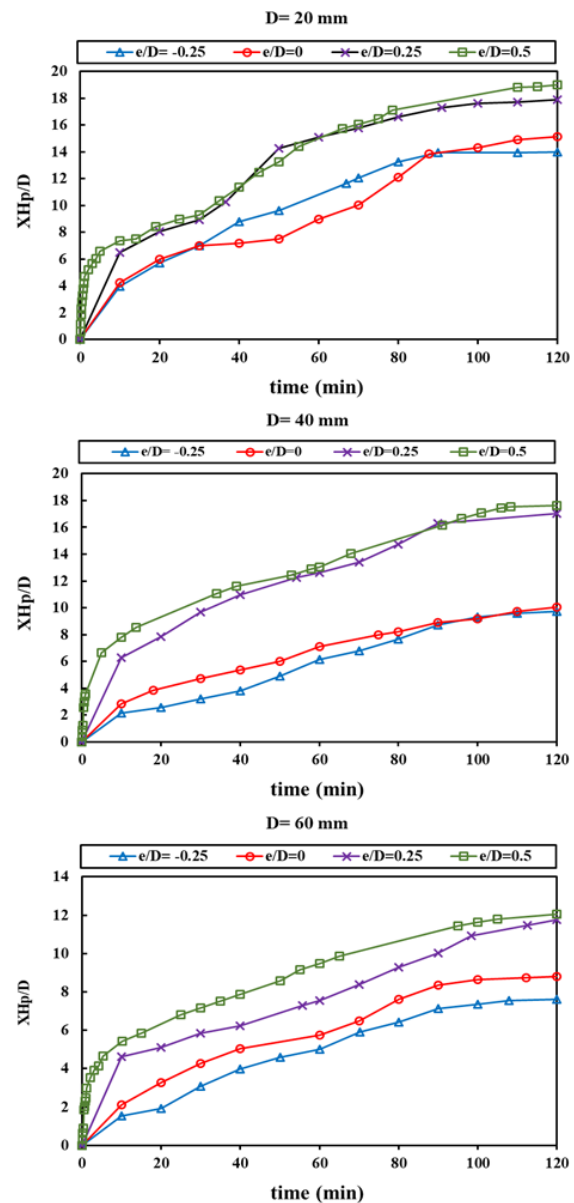


Fig. 11 Temporal Sediment ridge height development for different diameters and installation depth of pipe.

شکل ۱۱ تغییر پذیری‌های زمانی جابه‌جایی ارتفاع پشته‌ی رسوبگذاری برای عمق‌های کارگذاری و قطرهای مختلف لوله

در ۴۰ دقیقه آغازین هر آزمایش صورت گرفت. عمق کارگذاری لوله، یکی از عامل‌های بسیار موثر بر ابعاد چاله آبشستگی بود. بیشترین و کمترین میزان عمق آبشستگی به ترتیب در عمق‌های کارگذاری $e/D=0.5$ و $e/D=0.25$ مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان جابه‌جایی بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب در عمق‌های کارگذاری $e/D=0.5$ و $e/D=-0.25$ رخ داد. در همه‌ی آزمایش‌ها رسوب‌های حاصل از فرسایش در پایین دست لوله ترسیب کردند و تشکیل پشته رسوبی دادند. بیشترین و کمترین

Dey, S. and Singh, N.P., (2007). Clear-water scour depth below underwater pipelines. *Journal of Hydro-Environment Research*, 1(2), 157-162.

Ghodsian, M., Moncada-M, A.T. and Aguirre-Pe, J., (2000). Scour below Pipeline in River Crossing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(10), 793-793.

Jensen, B.L., Sumer, B.M., Jensen, H.R. and Fredsøe, J. (1990). Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current. *Journal of Offshore Mech. Arct. Eng.*, 112, 206–213.

Li, F. and Cheng, L. (1999). Numerical model for local scour under offshore pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 400-406.

Maza, J.A. (1987). Introduction to river engineering. *Advanced Course on Water Resources Management*, Universita Italiana per Stranieri.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (1991), January. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.

Sumer, B. and Fredsøe, J. (2002). The mechanics of scour in the marine environment. *Advanced series on ocean Engineering*, 17, World Scientific.

Wu, Y. and Chiew, Y.M. (2013). Mechanics of three-dimensional pipeline scour in unidirectional steady current. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 4(1), 3-10.

Yan, X., Mohammadian, A. and Rennie, C.D. (2020). Numerical modeling of flow and local scour around pipeline in steady currents using moving mesh with masked elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(5), 06020005.

Zhao, M., Vaidya, S., Zhang, Q. and Cheng, L. (2015). Local scour around two pipelines in tandem in steady current. *Coastal Engineering*, 98, 1-15.